

Modelos matemáticos preditivos: Análise de suas contribuições na prevenção de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado submetidas ao ataque de agentes agressivos em seu meio poroso

Predictive mathematical models: Analysis of their contributions in the prevention of pathological manifestations in reinforced concrete structures subjected to the attack of aggressive agents in their porous environment

Modelos matemáticos predictivos: Análisis de sus contribuciones en la prevención de manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón armado sometidas al ataque de agentes agresivos em su entorno poroso

Recebido: 12/04/2021 | Revisado: 19/04/2021 | Aceito: 12/05/2021 | Publicado: 28/05/2021

Silvandro Ferreira de Siqueira Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1642-7880>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: silvandro.ferreira@ufpe.br

Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4279-7156>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: arnaldo.carneiro@ufpe.br

Resumo

O concreto armado consiste em um material suscetível ao ataque de manifestações patológicas causadas pelo fluxo de agentes agressivos em seu meio poroso, os quais danificam a sua armadura de aço, reduzem o nível de resistividade de suas propriedades mecânicas e geram danos irreversíveis na estrutura quando nenhuma intervenção é realizada oportunamente. Graças a isso, modelos matemáticos preditivos devem ser utilizados como medida preventiva de forma a contribuir com a redução dos impactos socioeconômicos causados pela interdição dessas estruturas para realização de manutenções corretivas e com a redução dos impactos ambientais que são causados quando ocorre o colapso de uma estrutura de grande porte. Dessa forma, a presente pesquisa apresentará os modelos matemáticos preditivos mais atuais existentes na literatura internacional, através de revisão bibliográfica, os quais podem ser utilizados para prevenção dos danos causados pela carbonatação e pelo ataque de íons cloreto. Dentre os resultados encontrados destacam-se a possibilidade de utilização de modelos matemáticos na predição das manifestações patológicas supracitadas com a utilização de equações diferenciais parciais cujas soluções podem ser obtidas com o auxílio de softwares computacionais, além da sua contribuição com a prevenção da evolução dos danos promovidos pelas patologias em questão de maneira que eles não atinjam um patamar onde os custos com manutenções sejam mais elevados, viabilizando a realização de manutenções preventivas em períodos adequados com o objetivo de se prolongar a vida útil da estrutura.

Palavras-chave: Durabilidade; Modelos matemáticos; Patologia; Meio poroso; Concreto.

Abstract

Reinforced concrete consists of a material susceptible to attack by pathological manifestations caused by the flow of aggressive agents in its porous environment, which damage its steel armor, reduce the level of resistivity of its mechanical properties and generate irreversible damage to the structure when none intervention is carried out opportunely. Thanks to this, predictive mathematical models must be used as a preventive measure in order to contribute to the reduction of socioeconomic impacts caused by the interdiction of these structures to carry out corrective maintenance and to the reduction of the environmental impacts that are caused when a large-sized structure collapses. Thus, this research will present the most current predictive mathematical models in the international literature, through bibliographic review, which can be used to prevent damage caused by carbonation and by attack by chloride ions. Among the results found, the possibility of using mathematical models in the prediction of the

aforementioned pathological manifestations is highlighted with the use of partial differential equations whose solutions can be obtained with the aid of computational software, beyond your contribution to the prevention of damage evolution promoted by the pathologies in question so that they do not reach a level where maintenance costs are higher, making it possible to carry out preventive maintenance at appropriate times in order to prolong the useful life of the structure.

Keywords: Durability; Mathematical models; Pathology; Porous environment; Concrete.

Resumen

El hormigón armado consiste en un material susceptible de ser atacado por manifestaciones patológicas provocadas por el flujo de agentes agresivos en su entorno poroso, que dañan su armadura de acero, reducen el nivel de resistividad de sus propiedades mecánicas y generan daños irreversibles a la estructura cuando no se realiza ninguna intervención de manera oportuna. Gracias a ello, se deben utilizar modelos matemáticos predictivos como medida preventiva con el fin de contribuir a la reducción de los impactos socioeconómicos provocados por la interdicción de estas estructuras para realizar mantenimientos correctivos y a la reducción de los impactos ambientales que se provocan cuando una gran estructura se derrumba. Así, esta investigación presentará los modelos matemáticos predictivos más actuales en la literatura internacional, mediante revisión bibliográfica, los cuales pueden ser utilizados para prevenir daños por carbonatación y por ataque de iones cloruro. Entre los resultados encontrados, se destaca la posibilidad de utilizar modelos matemáticos en la predicción de las manifestaciones patológicas antes mencionadas con el uso de ecuaciones diferenciales parciales cuyas soluciones se pueden obtener con la ayuda de software computacional, además de su contribución a la prevención de evolución de daños promovida por las patologías en cuestión para que no alcancen un nivel en el que los costes de mantenimiento sean mayores, permitiendo realizar mantenimientos preventivos en los momentos oportunos con el fin de prolongar la vida útil de la estructura.

Palabras clave: Durabilidad; Modelos matemáticos; Patología; Entorno poroso; Hormigón.

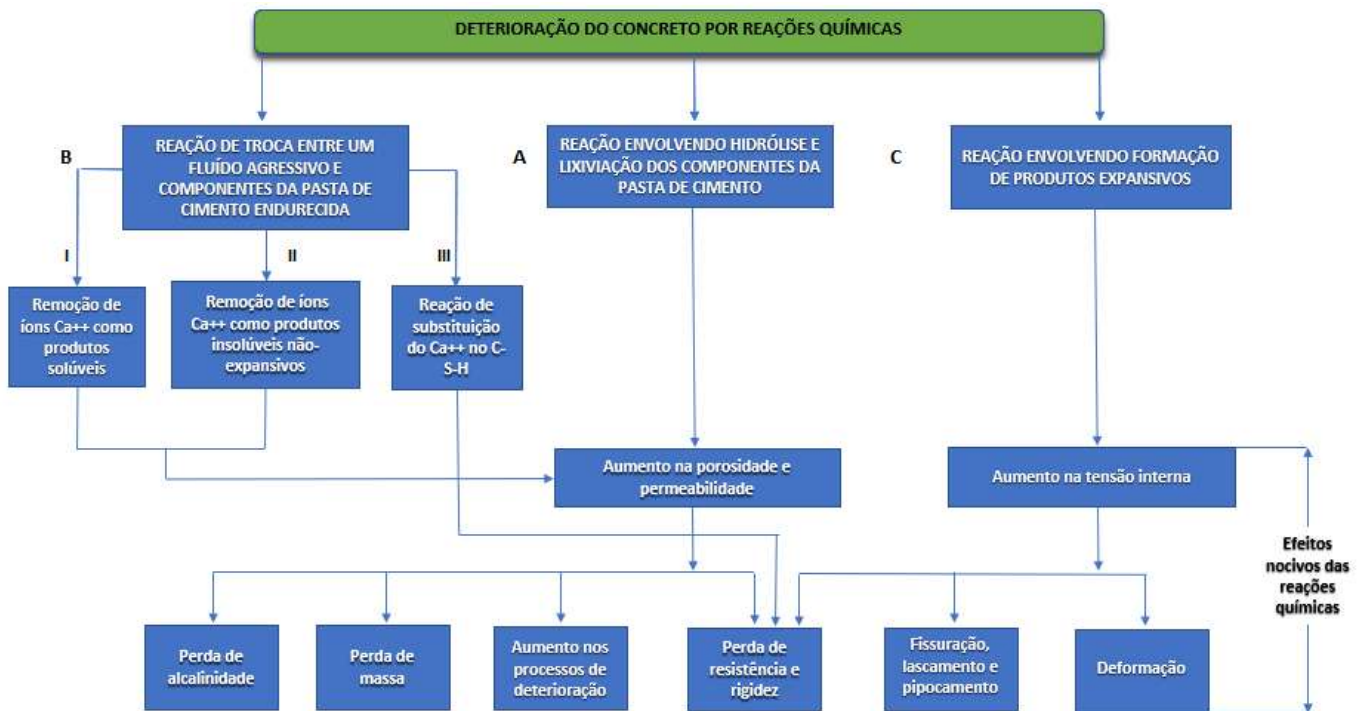
1. Introdução

Conforme Helene e Andrade (2017), o concreto de cimento Portland é o material estrutural mais importante da atualidade. Ele foi descoberto no século XIX e foi amplamente utilizado ao longo do século XX, tornando-se o material mais consumido pelo ser humano após a água. Mehta e Monteiro (2008), classificam o concreto como um material heterogêneo consistindo em um componente aglomerante (cimento Portland), agregados (miúdo e graúdo), água, adições e aditivos.

De acordo com Naaman (2001), todas as matrizes de concreto possuem, do ponto de vista mecânico, uma alta resistência à compressão em relação a sua resistência à tração. Graças a esse fato, geralmente o concreto possui uma armadura de aço embutida em seu interior com objetivo de maximizar essa propriedade, o que diferencia o concreto armado do concreto simples.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), quando a deterioração do concreto ocorre por intermédio de reações químicas, muitas vezes existe uma interação entre agentes agressivos do ambiente que, por percolação, penetram o concreto e reagem com os constituintes da pasta de cimento. Ainda conforme os autores, o CO₂ livre na água pura e estagnada e os íons cloreto (Cl⁻) são alguns dos agentes agressivos responsáveis por reduzir o pH do concreto geralmente básico (entre 12,5 e 13,5) para um patamar inferior a 6 (ácido), o que faz com que o concreto com esse nível de pH seja danoso à armadura de aço principalmente. A Figura 1 apresenta os tipos de reações químicas danosas que ocorrem no meio poroso do concreto.

Figura 1 - Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto.



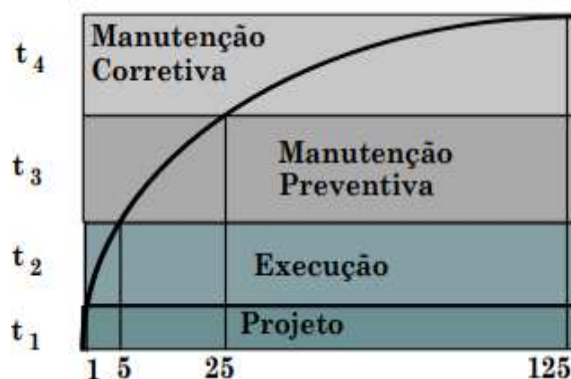
Fonte: Adaptado de Mehta e Gerwick Jr (1982).

Pela Figura 1 é possível visualizar que existem 3 possibilidades de deterioração do concreto por reações químicas, são elas: reação envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida; reações de troca entre um fluido agressivo e componentes da pasta de cimento endurecida; além de reação envolvendo a formação de produtos expansivos. A junção dessas 3 possibilidades acarreta na formação de micro e macro fissuras no concreto, assim como eleva os níveis de tensões internas no material, acelerando o processo de deterioração, deformação, perda de resistência e rigidez, dentre outros efeitos adversos.

Conforme Helene (1993), a taxa de transporte de agentes agressivos é conduzida pela taxa de penetração de água, pois para que esses agentes penetrem no concreto, faz-se necessário um fluxo mínimo de umidade. De acordo com Sato e Agopyan (1998), modificar a porosidade do concreto através de uma dosagem adequada pode constituir em uma solução econômica graças ao aumento da sua durabilidade. Assim, é possível reduzir o volume total de vazios juntamente com a redução da conectividade dos poros, o que auxilia na redução do fluxo de transporte de água, íons cloreto, CO_2 , álcalis, dentre outros agentes agressivos no interior do concreto. Ainda segundo os autores, esse fluxo ocorre por mecanismos de absorção capilar, permeabilidade, difusão e migração iônica quando ocorre a penetração de cloretos.

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011), o avanço no conhecimento acerca dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos no meio poroso do concreto propiciou uma evolução no estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado através da aplicação de modelos matemáticos que associam o tempo à evolução desses fenômenos, possibilitando a quantificação da vida útil da estrutura em anos frente aos critérios qualitativos de adequação da estrutura ao seu ambiente de exposição. Helene (2004) associa, em função do tempo (eixo y), o aumento do custo com manutenções nas estruturas de concreto armado (eixo x), conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Representação da evolução dos custos em função da fase da vida útil da estrutura quando a intervenção é realizada.



Fonte: Helene (2004).

A Figura 2 retrata que o custo de uma manutenção corretiva em uma obra pode ser 125 vezes maior que o custo de outro empreendimento idêntico quando não são tomadas as devidas precauções ainda na fase de projeto. Quando comparada com a etapa de manutenção preventiva, a manutenção corretiva possui um custo de 5 a 25 vezes maior a depender do estágio de deterioração da estrutura. Tendo em vista que ao redor do mundo já existem diversas estruturas de concreto armado construídas sem as devidas precauções nas fases de projeto e execução, maior se torna a necessidade de aplicação de modelos matemáticos na predição de patologias causadas em estruturas de concreto armado devido ao fluxo de agentes agressivos em seu meio poroso.

Pillai et al. (2018) enfatiza que a redução da vida útil das estruturas de concreto armado pode causar perdas socioeconômicas devido a necessidade de interdição de obras úteis à sociedade, gerando custos adicionais com reparos, além de aumentar o impacto ambiental graças a necessidade de consumo de mais cimento quando se faz necessária a construção de uma nova estrutura, gerando maiores emissões de CO₂ na atmosfera a cada ano.

Por sua vez, Kreyszig (2008), apresenta um arsenal de ferramentas matemáticas cujas aplicações podem ser empregadas nos mais diversos problemas de engenharia. Elas foram alvo de estudo e sofreram adaptações por alguns pesquisadores ao longo dos últimos anos, de forma a auxiliar os profissionais da construção civil na predição de eventos danosos às estruturas de concreto em suas mais diversas vertentes. Consequentemente, os dois modelos matemáticos mais atuais existentes na literatura, um para predição do ataque de íons cloreto e outro para a carbonatação, cujo objetivo é o monitoramento e prevenção do avanço da degradação acarretada pelas manifestações patológicas em questão, serão enfatizados ao longo desta pesquisa.

2. Metodologia

A metodologia do presente estudo, que trata-se de uma revisão bibliográfica qualitativa exploratória, consistiu da pesquisa por artigos, normas, livros, dissertações e teses publicados com o objetivo de conectar os dados relevantes encontrados com o propósito de produzir um conteúdo útil para todos aqueles que pesquisam acerca do tema que relaciona a aplicação de modelos matemáticos com a prevenção de manifestações patológicas que se desenvolvem no meio poroso do concreto armado devido ao ataque de agentes agressivos. Esses, em sua grande maioria, são provenientes do ambiente externo, sendo responsáveis pela redução da vida útil da estrutura.

As bases de dados utilizadas para a obtenção das referências que compõem o presente artigo foram: SCOPUS, SciELO, Google Acadêmico, além de livros e a NBR 6118/2014. Dessa maneira, os referenciais teóricos pesquisados sempre estiveram em consonância com a temática que engloba os seguintes tópicos que foram os descritores das pesquisas: meio poroso do

concreto; redução da elasticidade do concreto; durabilidade do concreto; modelos matemáticos preditivos de patologias no concreto; corrosão da armadura do concreto armado; patologias expansivas no concreto; ataque de íons cloreto e carbonatação do concreto.

As buscas pelos descritores supracitados foram realizadas tanto em português quanto em inglês e, durante as buscas, foi realizado o cruzamento desses tópicos. Outrossim, no que se refere aos modelos matemáticos, foram selecionados os dois mais atuais utilizados na predição do ataque de íons cloreto e da carbonatação, um para cada manifestação patológica. Por outro lado, a seleção da literatura acerca dos mecanismos de degradação do concreto ocasionados pelas duas manifestações patológicas em questão possuiu um período de busca mais amplo, quatro décadas, onde foram selecionadas as pesquisas que compõem a presente revisão.

3. Resultados e Discussão

3.1 Ataque de íons cloreto

O ataque de íons cloreto é uma manifestação patológica que, no concreto armado, agride gradativamente tanto o concreto quanto sua armadura de aço. Conforme Helene (1993), o ingresso dos íons cloreto no concreto pode ocorrer tanto por absorção capilar como por difusão. Contudo, para que isso ocorra, ele precisa estar diluído em água para que seja possível a sua penetração, pois, caso contrário, o cloreto na forma de cristal sólido possui dimensões muitas vezes maiores que os poros do concreto, o que inviabiliza o ataque no primeiro momento.

Helene (1981) descreve algumas das reações químicas que ocorrem no interior do concreto armado devido ao ataque de íons cloreto e que causam a corrosão da armadura de aço. São elas:



Após a hidrólise:



Uma rápida verificação de ambas as reações, conforme Pontes (2006), permite constatar que os íons cloreto que deram início a primeira reação química voltam a ficar disponíveis com o término da segunda reação, o que caracteriza a ciclicidade do processo químico que é danoso ao concreto armado.

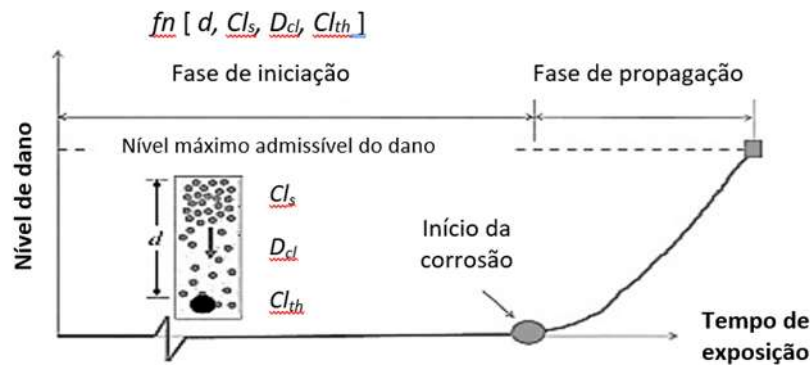
Segundo Magalhães (2019), com a transformação do aço em ferrugem, devido ao processo corrosivo do aço, ocorre um aumento de volume que pode chegar a magnitude de 600% do volume original do metal. O que amplia significativamente os níveis das tensões de tração internas, acelerando também o processo de degradação do concreto.

Por sua vez, Guzmán; Gálvez e Sancho (2011), citam a ampliação das rachaduras no cobrimento do concreto armado como outro efeito adverso que ocorre graças ao processo de expansão da armadura de aço quando ela é submetida à corrosão devido ao ataque de íons cloreto. Além disso, com o aumento nas dimensões das rachaduras, maior também se torna a exposição da estrutura de concreto armado ao agente agressivo em questão.

Outrossim, os efeitos adversos oriundos da corrosão causada pelo ataque de íons cloreto, de acordo com Mehta & Monteiro (2008), são visíveis através de fissuras, delaminação, manchas na superfície, destacamento do cobrimento do concreto, dentre outras complicações.

Tutti (1982) dividiu o processo de corrosão da armadura devido ao ataque de íons cloreto em 02 etapas: iniciação e propagação. Ainda conforme o autor, a etapa de iniciação consiste na fase onde os íons cloreto penetram e vão se acumulando no meio poroso do concreto até atingir uma concentração que dê início ao processo de corrosão da armadura. Após isso, tem início a fase de propagação da corrosão, a qual é altamente agressiva na estrutura, provocando níveis elevados de danos em um intervalo de tempo relativamente curto quando comparado ao tempo da etapa de iniciação. A Figura 3 retrata ambas as etapas.

Figura 3 - Etapas da corrosão e parâmetros de influência.



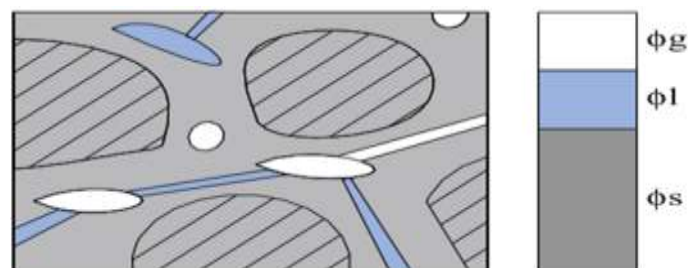
Fonte: Adaptado de Pillai et al. (2018).

Como pode ser visto na figura 03, impedir o início da corrosão caracterizado pela transição da fase de iniciação para a etapa de propagação é essencial para a manutenção de uma vida útil prolongada da estrutura, assim como possibilita a realização de intervenções com menores custos nas estruturas de concreto armado afetadas por essa manifestação patológica.

Em sua pesquisa, Pillai et al. (2018) aplicou um modelo matemático preditivo de corrosão devido ao ataque de íons cloreto em concretos dosados com diferentes tipos de cimento, no qual ficou evidente que o tipo de cimento, juntamente com sua composição, influencia diretamente na vida útil da estrutura que fica exposta a esse agente agressivo. Isso ocorre, pois alguns concretos apresentam menor coeficiente de difusão, o que já se configura como uma medida retardante da presente manifestação patológica.

Por sua vez, Bertolini et al. (2004), relacionam o fluxo de íons e fluídos no meio poroso do concreto a quatro mecanismos de transporte, são eles: absorção capilar; permeação; difusão e migração. Diante disso, Guzmán; Gálvez e Sancho (2011), abordaram em sua pesquisa um modelo matemático com base nos mecanismos de transporte da difusão e absorção capilar, pois ambos são os mecanismos governantes no concreto semi saturado (Figura 4).

Figura 4 - Representação da constituição de fases no meio poroso do concreto semi saturado.



Fonte: Guzmán; Gálvez e Sancho (2011).

Através da Figura 4 é possível visualizar os poros existentes no concreto, os quais estão preenchidos por substâncias no estado líquido ou gasoso. Dessa maneira, Guzmán; Gálvez e Sancho (2011) utilizaram-se de equações oriundas de diversos pesquisadores de forma a formular uma equação governante do presente ataque durante a fase de iniciação da corrosão. Para reproduzir o transporte de íons cloreto no meio poroso do concreto foram empregadas três variáveis: temperatura; concentração de cloretos (kg/m^3) e conteúdo de água evaporável. Graças a isso, e após todo o desenvolvimento de equações envolvendo difusão, absorção capilar e transferência de calor, foi encontrada a equação 3:

$$\left(\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} + \omega_e\right) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} + C_{fc} \frac{\partial \omega_e}{\partial t} = \text{div}(\omega_e D_c \nabla C_{fc}) + \text{div}(C_{fc} D_h \nabla h) \quad (3)$$

Onde:

ω_e = conteúdo de água

C_{bc} = concentração de cloretos ligados

C_{fc} = concentração de cloretos livres

h = umidade relativa do ambiente

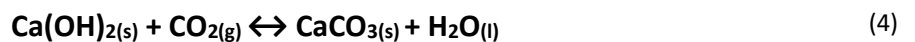
D_c = coeficiente de difusão

t = tempo

Conseqüentemente, de posse dos dados em questão, juntamente com o limite da concentração de íons cloretos previstos em norma para cada tipo de ambiente, de acordo com sua agressividade, é possível realizar a previsão de quando ocorrerá o término da fase de iniciação da corrosão e, dessa forma, programar manutenções preventivas de maneira a prolongar a vida útil da estrutura. No Brasil, a NBR 6118:2014 estabelece as classes de agressividade conforme o ambiente de exposição da estrutura. Além disso, ela apresenta as dimensões ideais do revestimento da armadura para cada um desses ambientes com a finalidade de minimizar o ingresso de agentes agressivos no concreto armado.

3.2 Carbonatação

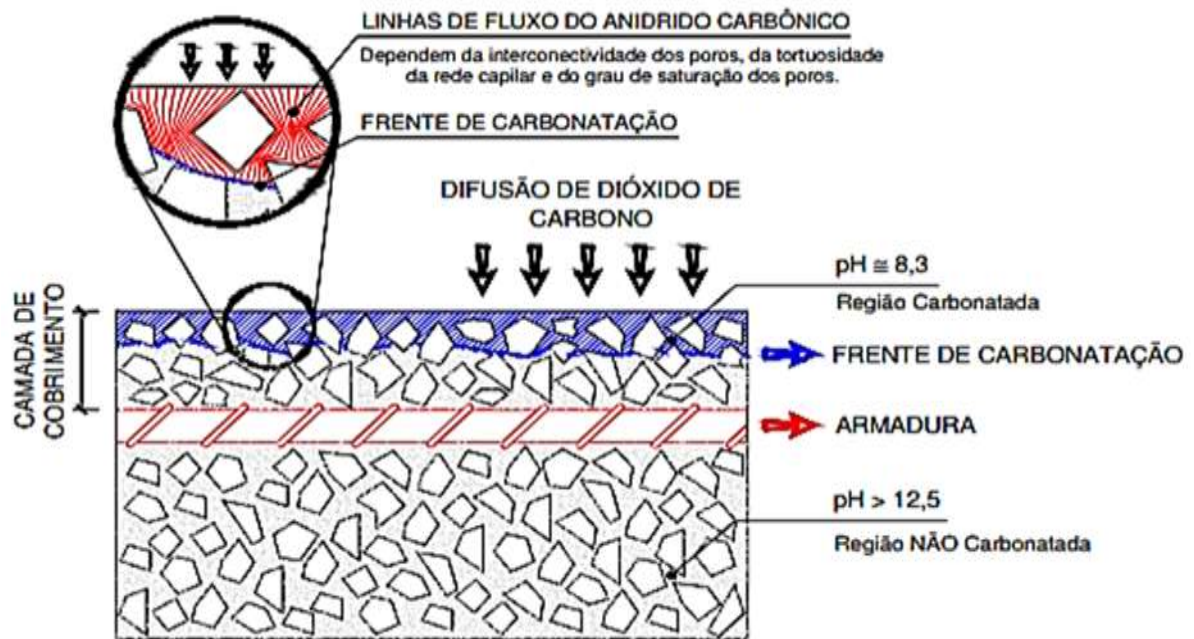
Outro processo altamente agressivo que ocorre no interior do concreto através do fluxo de substâncias em seu meio poroso é a carbonatação. Essa manifestação patológica consiste basicamente na reação do CO_2 atmosférico que penetra no meio poroso do concreto por meio de fissuras existentes no seu revestimento. Após o ingresso, o CO_2 encontra-se dissociado em meio aquoso juntamente com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que é um dos produtos da hidratação do cimento, Werle; Kazmierczak & Kulalowski (2011). Graças a isso, ambos reagem nos poros do concreto formando os produtos abaixo:



O grande problema da reação em questão é que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um dos principais responsáveis por manter o pH do concreto na faixa de 12,5 a 13,5 (básico). Com o seu constante consumo formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), por isso o nome carbonatação, o ambiente interno torna-se ácido gradativamente, conforme Medeiros e Helene (2001).

Ainda conforme Medeiros e Helene (2001), tendo em vista que o concreto armado possui uma armadura de aço embutida em sua estrutura com objetivo de maximizar a propriedade mecânica de resistência à tração, quanto mais ácido se torna o ambiente interno do concreto, devido à carbonatação, mais comprometida se torna também o nível de resistência à tração promovido pela armadura de aço pois fica suscetível à corrosão, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.



Fonte: Filho (2008), adaptado de Medeiros e Helene (2001).

A Figura 5 retrata o mecanismo de carbonatação. Ela consiste em uma seção de concreto armado onde é possível visualizar em destaque a armadura de aço sendo protegida por uma camada de cobertura. Contudo, com o passar do tempo, o dióxido de carbono penetra o concreto através de sua rede capilar formando a frente de carbonatação, o que gradativamente reduz o pH do concreto, resultando nas complicações supracitadas.

Analisando as reações químicas ocorridas na carbonatação de forma a iniciar a abordagem acerca do modelo matemático para a presente manifestação patológica, Park (2008) provou que metade do CO_2 que ingressa no concreto reage com a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) enquanto que a outra metade reage com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ambos produtos da hidratação do cimento.

Diante dessa premissa, Torres et al. (2017) elaboraram um modelo matemático simplificado para a carbonatação do concreto, o qual foi iniciado com uma equação amplamente utilizada no meio científico onde a profundidade da carbonatação (x) está em função da raiz quadrada do tempo de exposição em dias (t).

$$x = K\sqrt{t} \quad (5)$$

onde K = coeficiente de carbonatação.

De acordo com Moreno et al. (2004), quanto maior a relação água/cimento (a/c), maior também é a profundidade da carbonatação (Tabela 1).

Tabela 1 – Coeficiente de carbonatação atmosférico por razão (a/c).

razão a:c	K_{atm} (cm dia ^{-1/2})
0.4	0.0124
0.5	0.0165
0.6	0.0241

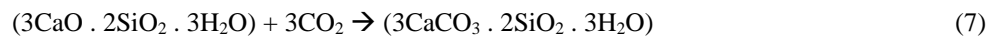
Fonte: Adaptado de Torres et al. (2017).

Consequentemente, conforme pode ser visto na Tabela 1, concretos com menor porosidade, devido a uma menor relação a/c, naturalmente limitam a difusão de CO₂ em seu interior.

Contudo, Correa et al. (2010) alegam que a carbonatação não é um fenômeno que depende exclusivamente do tempo, pois as propriedades do concreto, especialmente a resistência mecânica e a resistividade elétrica, são afetadas com o progresso dessa manifestação patológica.

Consequentemente, Torres et al. (2017), partiram para a análise das reações químicas que caracterizam a carbonatação para, em seguida, elaborar um modelo matemático útil na predição dessa manifestação patológica. Tudo isso, levando em consideração a difusão do CO₂ e a alteração da porosidade do concreto que ocorre graças a formação de produtos sólidos insolúveis resultantes da propagação de suas reações químicas características (Equações 6 e 7).

Reações químicas:



Diante das reações químicas supracitadas que ocorrem no interior do concreto, os autores deram continuidade na elaboração do modelo matemático simplificado até encontrar as seguintes equações diferenciais relativas à difusão do CO₂ no meio poroso do concreto (Equações 8 - 10) e as equações que regem a alteração da porosidade com o tempo (Equações 11 - 13).

Difusão do CO₂ no meio poroso:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial [CO_2]}{\partial x} \right) = [CO_2] (K_{Ca(OH)_2} [Ca(OH)_2] + 3K_{CSH} [CSH]) \quad (8)$$

$$\frac{\partial [Ca(OH)_2]}{\partial t} = - K_{Ca(OH)_2} [Ca(OH)_2] [CO_2] \quad (9)$$

$$\frac{\partial [CSH]}{\partial t} = - K_{CSH} [CSH] [CO_2] \quad (10)$$

Onde:

D_{CO_2} = coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s)

$[CO_2] - [Ca(OH)_2] - [CSH]$ = concentração molar (mol/m^3) de cada uma dessas substâncias

$K_{Ca(OH)_2}$ e K_{CSH} = taxa de reação constante ($m^3/mol/dia$)

Alteração da porosidade (graças a produção de $CaCO_3$ no meio poroso):

$$\Phi_{(t)} = \Phi_0 \exp^{-\beta \cdot \eta_{\min} \cdot t} \quad (11)$$

$$\Phi_0 = \frac{R_{w:c} \frac{\rho_c}{\rho_w}}{R_{w:c} \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) + R_{a:c} \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right) + 1} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{m_{CaCO_3}}{\rho_{CaCO_3}} - \frac{m_{Ca(OH)_2}}{\rho_{Ca(OH)_2}} \quad (13)$$

Onde:

$\Phi_{(t)}$ = porosidade do concreto em função do tempo

$\Phi_{(0)}$ = porosidade inicial do concreto

β = diferença entre o volume (em mols) ocupado pelos dois reagentes

η_{\min} = limite mínimo da cinética da carbonatação

t = tempo em dias

ρ_a, ρ_c, ρ_w = densidade dos agregados, cimento e água, respectivamente.

m = massa molar (g/mol)

$R_{a:c}$ = razão agregados cimento

$R_{w:c}$ = razão água cimento

Por sua vez, Burkan & Razaqpur (2004) citam uma equação para a difusão do CO_2 em função do tempo, a qual leva em consideração a umidade relativa (Equação 14).

$$D_{CO_2} = 1.64 \times 10^{-6} \times \Phi_{(0)}^a \times (1 - RH)^b \quad (14)$$

Onde:

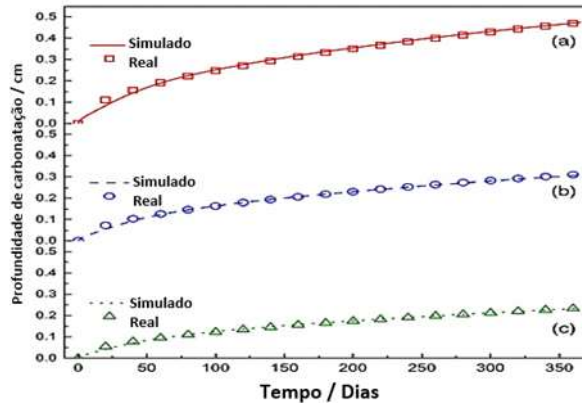
a e b = parâmetros obtidos por Wang & Lee (2009) a partir de experimentos com a carbonatação.

RH = umidade relativa

Através das pesquisas de Peter et al. (2008) e Meier et al. (2005) e (2007), com o cimento Portland tipo I, foram obtidas as concentrações iniciais de portlandita e silicato de cálcio hidratado como 1,04 e 0,1257 mol/L. Torres et al. (2017)

encontraram a concentração de CO₂ através da câmara de teste de carbonatação acelerada no valor de 4%. Outrossim, resolvendo as equações diferenciais associadas às equações de alteração da porosidade com o auxílio de softwares computacionais (Maple, Matlab e Python, por exemplo) é possível simular a profundidade da carbonatação em função do tempo para concretos com variadas relações água/cimento. A Figura 6 mostra alguns dos resultados encontrados pelos autores.

Figura 6 - Profundidade da carbonatação em função do tempo com diferentes razões a/c. (a) = 0,6; (b) = 0,5; (c) = 0,4.



Fonte: Adaptado de Torres et al. (2007).

Ou seja, a Figura 6 mostra as diferenças encontradas na profundidade de carbonatação para amostras com diferentes razões a/c ao longo do tempo. O experimento comprova que, com o passar dos dias, a tendência é de que amostras de concreto com maior razão a/c possua maiores profundidades de carbonatação, o que é aplicável nos casos reais.

Conseqüentemente, fazer uso do mesmo modus operandi aqui apresentado, com a realização das devidas alterações para cada variável, consiste em uma medida preventiva de maneira a inferir, de antemão, quando uma profundidade de carbonatação alcançará os limites previstos em norma para cada tipo de ambiente.

4. Conclusão

Com base na presente pesquisa, as seguintes conclusões podem ser elencadas:

A busca da maior durabilidade da estrutura deve ser o desejo de todos os profissionais envolvidos no processo construtivo, especialmente, ainda na fase de planejamento do empreendimento, onde podem ser definidos os materiais mais adequados ao local e às condições nas quais o empreendimento será executado, tendo em vista que o concreto estará exposto à intempéries independentemente de sua localização.

Na presente pesquisa foram abordados os dois modelos matemáticos preditivos mais atuais existentes na literatura com o objetivo de monitorar o avanço da degradação do concreto armado acarretado por duas manifestações patológicas que o atingem quando ele apresenta um raio capilar extenso o suficiente para permitir a invasão de agentes agressivos externos, as quais são extremamente nocivas. As manifestações patológicas em questão foram: ataque de íons cloreto e carbonatação.

O meio poroso do concreto é um ambiente propício ao desenvolvimento e propagação dessas manifestações patológicas. Graças a isso, medidas preventivas como a utilização de ferramentas quantitativas, caso dos modelos matemáticos preditivos, devem ser adotadas ainda na fase de projeto do empreendimento de forma a minimizar e retardar a ocorrência dessas manifestações patológicas em novas estruturas.

Devido ao fato de que a grande maioria das estruturas existentes não foram alvo de estudos preventivos minuciosos durante suas fases de projeto e execução, realizar manutenções periódicas oportunas é uma necessidade essencial para que o processo de reparação desses empreendimentos não se torne inviável graças a abrupta elevação de custos decorrentes do

aumento da degradação do concreto armado, com o passar do tempo, quando submetido às manifestações patológicas apresentadas nesta pesquisa.

Conseqüentemente, modelos matemáticos preditivos vêm sendo amplamente utilizados ao redor do mundo na predição de manifestações patológicas em estruturas com diferentes tipos de concreto. Dessa maneira, eles contribuem para a predição de eventos adversos em estruturas de concreto armado submetidas ao ataque de íons cloreto e à carbonatação, o que auxilia os profissionais da construção civil e gestores de obras, viabilizando uma tomada de decisão mais assertiva no que diz respeito a realizações de manutenções preventivas em períodos oportunos.

A aplicação dos modelos matemáticos apresentados nesta pesquisa geralmente é realizada com o auxílio de softwares computacionais, (Maple, Matlab e Python, por exemplo), tendo em vista o alto nível de complexidade das operações matemáticas envolvidas. Outrossim, para o êxito na obtenção dos resultados corretos, o usuário deve fornecer, ao software, as informações orientadas neste artigo de forma minuciosa, conferindo especial atenção aos valores previstos em norma de acordo com cada país.

Referências

- André, R. F. C. (2013). Reparação de estruturas de betão armado afetado pela carbonatação do betão e corrosão das armaduras. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2014). NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. & Polder, R. P. (2004) Corrosion of Steel in Concrete. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim.
- Burkan, O. & Razaqpur, A. G. (2004). Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cem. Concr. Compos*, 26(1), 57–73. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00125-7.
- Correa, E., Penaranda, S., Castaño, J. G. & Echeverría, F. (2010). Concrete deterioration in Colombian Urban Atmospheres. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 52, 41 – 46.
- Filho, J. H. (2008). Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Guzmán, S., Gálvez, J. C. & Sancho, J. M. (2011). Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *Cement and Concrete Research* 41, 893 – 902. 10.1016/j.cemconres.2011.04.008
- Helene, P. (2004). A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. II Seminário de patologia das edificações do LEME. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Helene, P. R. L. (1981). Corrosão em armaduras de concreto armado. In: aplicação da tecnologia do concreto, 4, 1-44. Anais... SIMPATCON.
- Helene, P. & Andrade, T. (2017). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. (3a ed.), Instituto Brasileiro de Concreto, São Paulo.
- Helene, P. R. L. (1993). Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 231p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Kreyszig, E. (2008). *Matemática Superior para Engenharia*. Editora LTC, (9a ed.), 1.
- Magalhães, T. A. (2019). Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Medeiros, M. H. F., Andrade, J. J. O., & Helene, P. R. L. (2011). Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: Geraldo Isaia. (Org.). *Concreto: Ciência & Tecnologia*. IBRACON, 1, 773 -808.
- Medeiros, M. H. F., & Helene, P. R. L. (2001). Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. *Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia*. 4(4), 3 -12. Vitória.
- Mehta, P. K. & Gerwick, B. C. Jr. (1982). *Cracking-corrosion interaction in concrete exposed in marine environment*. *Concrete International*, Michigan, 4(10), 45 – 51.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2008). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. PINI.
- Meier, S. A., Peter, M. A., Muntean, A. & Bohm, M. (2005). Modelling and simulation of concrete carbonation with internal layers. Univ. of Bremen, Centre for Industrial Mathematics, Bremen, Germany.

- Meier, S. A., Peter, M. A., Muntean, A. & Bohm, M. (2007). Dynamics of the internal reaction layer arising during carbonation of concrete. *Chem. Eng. Sci.*, 62(4), 1125 – 1137. 10.1016/j.ces.2006.11.014.
- Moreno, E., Domínguez, G., Cob, J. & Duarte, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8-2, 117 – 130.
- Naaman, A. E. (2001). Reinforced Concrete. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 8095–8109. doi:10.1016/b0-08-043152-6/01454-6.
- Park, D. C. (2008). Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings. *Constr. Build. Mater.*, 22(11), 2260–2268. 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.032.
- Peter, M. A., Muntean, A., Meier, S. A. & Bohm, M. (2008). Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. *Cem. Concr. Res.*, 38(12), 1385–1393. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.09.003.
- Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S. & Basavaraj, A. S. (2018). Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC³). *Cement and Concrete Research*. 10.1016/j.cemconres.2018.11.019.
- Pontes, R. B. (2006). Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE. Dissertação de mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife.
- Sato, N. M. N. & Agopyan, V. (1998). Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. Epusp/PCC.
- Torres, H., Correa, E., Castaño, J. G. & Echeverría, F. (2017). Simplified mathematical model for concrete carbonation. *American Society of Civil Engineers*, 29(10): 04017150. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002001.
- Tutti, K. (1982). Corrosion of steel in concrete. (Ph.D. Thesis), Lund University, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- Wang, X.Y. & Lee, H. S. (2009). A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. *Constr. Build. Mater.*, 23(2), 725–733. 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
- Werle, A. P., Kazmierczak, C. S. & Kulakowski, M. P. (2011). Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. *Revista Ambiente Construído*, 11(2), 213-228. 10.1590/S1678-86212011000200015.